

Науки о Земле на рубеже веков

Н. Л. Добрецов

Век двадцатый – век физики, век промышленной революции. Геология и вообще науки о Земле были преимущественно науками описательными и долгое время не шли в физико-математическом «фарватере». Только физика атмосферы и частично океанология развивались, как и физические науки, в русле общего движения. В последние 30 лет ситуация существенно изменилась. В геологии появилась новая парадигма – тектоника плит, которая дает все больше и больше возможностей количественно описывать и предсказывать широкий круг процессов, происходящих на Земле, – от землетрясений до образования месторождений полезных ископаемых.

Развитие теории

С позиций тектоники плит все движения на поверхности Земли можно описать относительным перемещением ограниченного числа жестких литосферных плит средней мощности 100 км при протяженности каждой плиты до 10 тыс. км. У этих плит есть два типа главных границ: границы расхождения, или растяжения (так называемые *зоны спрединга*), – впервые предложенные американским ученым Хессом, одним из инициаторов и энтузиастов исследования океанов, который во время войны был начальником штаба американских подводных лодок, – и границы поглощения, или сжатия, где океанические плиты погружаются под континент (*зоны субдукции*), впервые предсказанные русским академиком А. Н. Заварицким и японским ученым Вадати. Зоны спрединга подразделяются на быстрые, где они сопрягаются с зонами субдукции и средняя скорость расхождения плит достигает 8–12 см в год, и медленные, где они не сопрягаются с зонами субдукции (Срединно-Атлантический океан) и средняя скорость расхождения плит составляет 2–4 см в год. В Индийском океане, например, происходит чередование зон быстрого и медленного спрединга. Довольно детальная картина дна этих участков получена с помощью спутников – методом альтиметрии. Точные измерения уровня океана, которые отражают глубину океана, при тысячекратном повторении позволяют как бы детально видеть дно океана. Здесь все участки быстрого спрединга примыкают к участкам окраины океана, где есть субдукция.

Если плиты расходятся, в появившуюся трещину всасывается пластическое вещество верхней мантии, обогащенное расплавом. Возникает магматическая камера всего 5–7 км в поперечнике, вещество в ней непрерывно кристаллизуется. Таким образом, наверху изливаются лавы, в промежуточной зоне появляются трещины, они заполняются расплавом, и образуется пакет из плоских одно-, двухметровых диабазовых пластин. Все тысячекилометровые пространства дна океана построены таким однотипным довольно простым способом.

Но в районе Камчатки и Курил, например, представлены гораздо более сложные участки – зоны субдукции (поглощения), где океаническая плита погружается под континентальную плиту или островную дугу. Большая часть вулканов здесь располагается на глубине 100–120 км, а некоторые даже на глубине 200 км. Они фиксируют зону плавления, находящуюся на уровне 120–160 км, где нет землетрясений из-за наличия магматической «смазки». Нет землетрясений также в интервале 80–40 км. Здесь «смазка» возникает за счет флюида, выделяющегося при дегидратации пород, затянутых в зону субдукции. Потоки флюидов вблизи поверхности формируют главные типы сульфидных рудных месторождений перед фронтом вулканических зон.

В результате физического и математического моделирования предсказана периодичность расположения магматических центров вдоль дуги (со средним расстоянием между ними 70–100 км) и скорость подъема магматического пузыря на поверхность (в среднем 20 км за миллион лет). Сформулирован также критерий определения условий, при которых этот пузырь, не дойдя до поверхности, из-за нехватки питающего материала кристаллизуется, и магматизм на поверхности проявлен не будет. Такие дуги известны, например, южнопонская дуга Окинава, где субдукция есть, а магматизма нет. В геологическом прошлом таких дуг могло быть гораздо больше.

Конвективные течения в верхней части мантии, в астеносфере, довольно быстрые (примерно 20 см в год), эти течения определяют движение плит и их погружение в зонах субдукции. В нижней мантии, где есть своя независимая и довольно сложная система конвекции, движение плит относительно медленное – 1–2 см в год.

Было время, когда в феноменологической части теории тектоники плит, активно развивавшейся на Западе, наши специалисты долго находились в хвосте и даже, в каком-то смысле, в оппозиции. Но сегодня моделирование, развиваемое в институтах Сибирского отделения, позволяет нам выйти на передовые позиции. Так, в результате экспериментов получена многослойная картина конвективных течений

и предсказаны разделение нижней мантии на три слоя и довольно сильная ее анизотропия, ориентированная перпендикулярно зонам субдукции.

Движение плит сегодня уже не гипотеза, а однозначно доказанный на основании многолетних измерений со спутников факт, причем предсказанные теоретически скорости движения плит отличаются от полученных с помощью спутников в среднем всего на 5 процентов, что говорит о высоком уровне разработки теории. На базе этой теории сделаны многие удивительные открытия. Когда я был студентом, нам всегда доказывали, что Тихий океан самый древний, можно сказать, вечный океан. Теперь стало известно, что он образовался за счет раскола одного суперматерика в тройном узле между Азией, Северной Америкой и Австралией и растяжения континентальных плит 600–700 млн лет назад. По геологическим меркам – недавно, поскольку история Земли насчитывает 4,5 млрд лет.

Другие геологические процессы, не зависящие от движения плит, связаны с мантийными струями, или плюмами, поднимающимися от границы ядро – мантия. Эффектным примером их может служить Прибайкалье и Забайкалье. Здесь функционирует так называемый монгольский суперплюм, северная его половина занимает российскую территорию, а южная охватывает большую часть Монголии. Профили, построенные нашим молодым ученым И. Кулаковым с помощью усовершенствованной инверсионной сейсмотомографической модели, показывают, что в мантии имеются горячие струи довольно сложной конфигурации, расщепляющиеся как раз под Байкалом, который одновременно является крупнейшей границей между Сибирской платформой и Забайкальской складчатой областью. По моей интерпретации, под всеми горячими струями в Забайкалье и Монголии залегает, словно единая шляпка гриба, нижнемантийный плюм. Мантийные струи в ОИГГиМ экспериментально изучались и моделировались. Простейшими струями являются чисто тепловые струи. Если они действуют долго, то начинают винтовым образом вращаться, и это вращение фиксируется в виде соответствующих петель, или восьмерок, миграции вулканов на поверхности. Например, на Удоканском вулканическом плато (северная часть Байкальской зоны) или в известной Гавайской цепи вулканов, порожденной плюмом, такая восьмерка отчетливо фиксируется.

Вулканизм, связанный с горячими мантийными струями, как бы альтернатива магматизму, который происходит в островных дугах. Среднее количество тепла, выносимое этими магмами, одно и то же,

но с течением времени оно меняется. Из истории развития островных дуг в течение последних 90 млн лет видно, что все они были активны последние 60 млн лет и наблюдаются два максимума активности – один современный, другой – на уровне 30 млн лет. С кривой островодужного вулканизма коррелируют кривая уровня океана и общий объем вулканизма в океанах. И как раз в антифазе проявляется магматизм, связанный с мантийными струями. Когда в островных дугах общий океанический магматизм падает или его нет совсем, наблюдается максимум мантийного плюмового магматизма и наоборот. То есть тепловая машина Земли работает с двумя клапанами, двумя важнейшими регуляторами: зонами субдукции и зонами мантийных струй, аналогичными таковым вокруг Байкала.

Мантийные струи задают главную геологическую периодичность – с периодом около 30 млн лет. Этой периодичности соответствуют самые разные геологические события – глаукофановый метаморфизм, этапы формирования офиолитов (древней океанической коры), этапы оруденения и т. д.

Проявлен также другой период – около 110–120 млн лет. И, что самое интересное, периодичность прослеживается на кривой, характеризующей содержание в морской воде кальция, который, в свою очередь, сильно влияет на развитие биоты. В частности, этот параметр являлся одним из главных регуляторов в развитии планктонной жизни в океане.

События века

Около 600 млн лет назад, когда содержание кальция в морской воде составляло максимальные значения, произошла вспышка в развитии идиокарской фауны. Ее представителями были медузоподобные существа, отпечатки которых сохранились в так называемых вендских отложениях. Интересно, что еще ранее была вспышка планктонной жизни. Открытие этой фауны и обоснование особого вендского периода в истории Земли связано с именем нашего сибирского ученого – академика Бориса Сергеевича Соколова. Это в истории геологии можно считать открытием века.

После того как медузообразные организмы вымерли, резко изменилось направление эволюции жизни и быстрыми темпами стали развиваться скелетные формы, появилось их структурное и морфологическое разнообразие. И бактерии, и простейшие планктонные организмы, конечно, не имели многих функций, которые потом возникли у развитых форм жизни. Объяснить появление весьма совер-

шенного механизма клеточной регуляции можно именно тем, что клетка эволюционировала довольно долго (более 3 млрд лет) и в океаническом «бульоне» могло произойти огромное число (порядка 10^{40} – 10^{50}) актов ее изменения.

С вендским и особенно предвендским периодом, со вспышками планктонных форм жизни связаны первые крупные накопления нефти и газа. Открытие в Сибири нефтяных и газовых месторождений можно считать событием века номер два. Всего здесь, в Сибири, 59 крупных месторождений нефти и газа, большая часть которых находится в Западной Сибири, немало их и в Восточной Сибири, на так называемой Сибирской платформе. Открытие месторождений Западной Сибири было предсказано академиком И. М. Губкиным. Сибирские геологи, лидером которых долгое время был академик Андрей Алексеевич Трофимук (сегодня лидером является его ученик академик А. Э. Конторович), продолжают и сегодня изучать эти месторождения. Другим примером крупного научного прогноза стало открытие в Восточной Сибири месторождений древней нефти, сделанное А. А. Трофимуком, можно сказать, на кончике пера – на основе очень небольшого количества эмпирических данных. Главные запасы нефти и газа здесь сконцентрированы именно в рифейских отложениях и связаны с вышеупомянутой вспышкой планктонно-бактериальных форм органического вещества в океанах. Как правило, нефть и газ мигрируют вверх по разрезу, до следующего битуминозного горизонта, их взаимодействие с битумами и определяет рождение промышленных залежей нефти.

Открытие века номер три – газогидраты. Оно тоже сделано А. А. Трофимуком с коллегами. Сегодня, по оценкам одних ученых, газогидратов, содержащих метан и другие углеводороды (но главным образом метан), на порядок больше (а по оценкам других – на два порядка), чем всех запасов нефти, газа и угля, вместе взятых. Конечно, в XXI в. газогидраты будут главным энергетическим ресурсом, наряду с атомной энергетикой. Но этот ресурс требует совершенно новых технологий, к разработке которых ученые только приступают.

Что такое газогидраты? Это похожая на лед каркасная структура из молекул воды, в центре которых находятся молекулы метана. Такая каркасная структура имеет много аналогий с другими природными соединениями. Но здесь существенно то, что разрушение газогидратов – твердых льдоподобных веществ – сопровождается увеличением на порядок объема газов. И если нам грозит потепление, то одним из наиболее серьезных его следствий будет разрушение газогидратов, при

котором парниковые газы, и прежде всего метан, в атмосфере Земли достигнут очень высоких концентраций. Тогда это потепление для нашей планеты может стать катастрофическим.

Еще одним событием века стало открытие месторождений алмазов на Сибирской платформе, сделанное (тоже «на кончике пера») академиком Владимиром Степановичем Соболевым на основе установления аналогии Сибирской платформы с Южной Африкой. Давно известна субмеридиональная зона, где концентрируются главные алмазоносные поля, в том числе Далдыно-Алакитское, где находятся трубки «Айхал» и «Удачная», которые были главным источником добычи алмазов в последние годы. Совсем недавно на одной линии с трубкой «Мир» открыта новая очень богатая трубка, которая позволит Якутии успешно продолжать добычу алмазов, обеспечивая ее претензии на суверенитет еще долгое время. Мне кажется, что два поля локализации здесь алмазоносных кимберлитовых трубок порождены такими же плюмами, как Монгольский суперплюм, поэтому наиболее крупные месторождения следует и в дальнейшем искать по периметру обозначенного на рисунке южного овала.

Важным достижением геологической науки была разработка минералогических методов поиска алмазов под руководством академика Н. В. Соболева-младшего. Главное значение для прогноза и количественного предсказания алмазоносности трубок имеет наличие низкокальциевых высокохромистых гранатов. Сегодня все алмазодобывающие компании имеют микрозонды, которые позволяют в массовых количествах анализировать гранаты, попадающие в руки исследователей. Это довольно надежный инструмент предсказания алмазоносности трубок.

В Объединенном институте геологии, геофизики и минералогии продолжают экспериментальные работы по синтезу алмазов. Сегодня при Институте организовано полупромышленное предприятие по выпуску крупных алмазов ювелирного и высокого технического качества размером до пяти каратов на созданной только у нас в стране аппаратуре типа разрезной сферы.

И, наконец, последняя страница алмазной «истории» – открытие алмазов метаморфического типа в Кокчетавском массиве (Казахстан). На обложке одного американского журнала был показан найденный там кристалл граната с множеством мелких метаморфических алмазных зерен размером в поперечнике всего около 50 микрон. Эти алмазы – тоже ресурс будущего, поскольку их содержание в некоторых метаморфических породах достигает 3 тыс. каратов, что в тысячу раз

(или на три порядка) больше, чем в кимберлитах. Это уже не караты, а килограммы на тонну. К сожалению, пока еще нет хороших технологий дешевого извлечения и использования очень мелких алмазов. Сами эти алмазоносные породы тоже являются как бы «окном», позволяющим заглянуть в вышеупомянутые зоны субдукции и понять, что же там происходит. Кривые эволюции температуры и давления, построенные по алмазам и ассоциирующим минералам, отражают историю вмещающих их пород, которые сначала оказались на глубине 160 км (под давлением 50 кбар), а затем были оттуда извлечены. Это сложная геологическая и физико-химическая задача – не только «доставить» на глубину 150–200 км, но и извлечь оттуда целые горы.

Глобальные изменения и окружающая среда

Науки о Земле все более становятся науками об окружающей среде. Примером успешной научной работы в этом направлении является российско-японско-американский проект «Байкал-бурение». Рассмотрим сначала взаимосвязь главных факторов формирования климата Земли. В этом процессе участвуют как очень длиннопериодные (миллионолетние) колебания, так и периоды, связанные с положением Земли на орбите. Колебания с периодом 100 тыс. лет связаны с эксцентриситетом орбиты Земли, а с периодом около 41 тыс. лет – с изменением наклона оси вращения. Действует и третий фактор, связанный с прецессией орбиты Земли. На эту картину накладываются еще колебания с периодом около 10 тыс. лет, связанные с автоколебательным характером энергомассообмена в системе океан – атмосфера – суша – масса льда. В результате получается, что периоды потепления и похолодания чередуются, причем интервалы между этими периодами либо 10, либо 30 тыс. лет, либо более.

Но это упрощенная схема. Если вспомнить теорию таких колебательных процессов с разной частотой, то следует учесть, что здесь может появиться целый ряд дополнительных нелинейных эффектов. Поэтому предсказать характер будущего потепления и оледенения только с помощью этой простой схемы довольно сложно. Тем не менее только проверка длинной истории в геологическом прошлом позволит обоснованно строить модели предсказания климата, поскольку за очень короткий инструментальный период наблюдений построить правдоподобную модель климата Земли невозможно. Проект «Байкал-бурение» под руководством чл.-кор. М. И. Кузьмина как раз и позволил получить непрерывную высокоразрешающую запись палеоклиматов Восточной Сибири за 130 тыс. лет. Это стало возможно благодаря тому,

что на Академическом хребте (подводном поднятии) есть донные осадки, относящиеся к периодам оледенения. Анализ «сигналов климата», записанных в осадках Байкала, подтверждает, что здесь главными факторами и главными периодами являются период 100 тыс. лет, связанный с эксцентриситетом орбиты Земли, период 41 тыс. лет, связанный с наклоном орбиты, и период 19–23 тыс. лет., связанный с прецессией. Но проявляются и дополнительные эффекты.

Сравнивались данные по изменению климата в океане и около Байкала. В качестве сигналов климата в океане использовалось соотношение изотопов кислорода, поскольку оно напрямую связано с объемами льда – чем больше льда, тем больше смещение в пользу тяжелого изотопа кислорода. Изменения климата в байкальских осадках фиксировались по другому индикатору – содержанию биогенного кремнезема, поскольку в теплые периоды в осадках Байкала накапливались преимущественно кремниевые скелеты диатомовых.

Сравнение этих кривых показывает их общее подобие для периодов в 50–150, 150–200 и 200–250 тыс. лет. Но в осадках Байкала зафиксированы гораздо более резкие кратковременные похолодания за время порядка 100 лет. Эти резкие локальные похолодания довольно хорошо совпадают с предсказанными по модели Шорта наиболее сильными похолоданиями, основанными на реконструкции максимальных летних температур Центральной Азии с использованием инерционности системы океан – суша – атмосфера.

Оказывают воздействие на климат и колебания, связанные с изменением солнечной активности. Известен 22-летний период, отражающийся в числах Вольфа, которые показывают относительное количество пятен на Солнце. Отмечено также изменение длины цикла солнечной активности с периодом около 50 лет. Этот цикл лучше всего коррелирует с такими показателями, как длительность незамерзающего состояния Ангары около Иркутска или флуктуации уровня Байкала. Из этих примеров следует, что колебания экосистемы Байкала напрямую зависят от состояния активности Солнца, но, к сожалению, сегодня нам неизвестно, имеются ли более длительные колебания, связанные с солнечной активностью и как это можно оценить в прошлые эпохи. Как показали выполненные академиком Е. А. Вагановым исследования ширины древесных колец, холодные и теплые периоды чередовались через каждые 700–800 лет. Эти 800-летние колебания, возможно, также связаны с изменением солнечной активности.

Прогноз грядущего потепления – довольно сложная задача, которая

требует не только учета истории Земли, но и создания «высоких» численных моделей, о которых говорил академик С. К. Годунов. Это, вероятно, одна из решаемых, но трудно решаемых задач, однако от нее зависят очень важные следствия. Для Сибири это прежде всего разрушение вечной мерзлоты и ископаемых льдов, которые широко распространены в северной части Сибири – на полуострове Ямал, побережье Северного Ледовитого океана. Их таяние и разрушение мерзлоты может привести к разрушению всей нефте- и газодобывающей инфраструктуры, поэтому нам необходимо, с одной стороны, повысить точность прогнозов изменения климата, а с другой – готовиться к ним.

И последний фрагмент, иллюстрирующий то, как уникальная экосистема Байкала менялась в зависимости от изменения геологических факторов, и чем она сегодня регулируется. Пример связан с рачком гаммарус, у которого есть две популяции: одна обитает севернее истока Ангары, другая – южнее. Методами молекулярной биологии было установлено, что разделение на две генетические группы произошло 50 тыс. лет назад – точно тогда, когда возник исток Ангары; водная преграда не позволила дальше этим популяциям обмениваться друг с другом. Молекулярная биология помогла установить, что все гидробионты, основные организмы Байкала, 75 процентов которых эндемики (для Сибири в целом этот показатель гораздо ниже и составляет в среднем 30 процентов), – сравнительно молодая популяция, т. е. возникла 2,5 млн лет назад (молодая в геологическом смысле, поскольку история Байкала насчитывает 30 млн лет). Произошло это в период, когда вокруг Байкала образовались высокие горы, а само озеро стало глубже и в нем возникла уникальная система циркуляции воды.

Одно из доказательств уникальности Байкала – возраст его воды. Он был числен по высокоточным данным распределения в ней фреона. Даже в самой глубокой части озера возраст воды не более 16 лет, а на дне даже меньше – 8–10 лет. Установлено, что весь Байкал перемешивается полностью примерно за 16 лет. В некоторые периоды, особенно весной, когда происходит таяние льда, возникает высокая скорость перемешивания за счет того, что поверхностная вода лавинообразно опускается на дно. Кроме того, в Байкале исключительно пресная, низкоминерализованная, холодная вода. Впадая в него, более теплая, но более соленая вода Селенги тоже лавинообразно опускается на дно. Именно эти регуляторы и обеспечивают столь интенсивное перемешивание воды в Байкале. А это, в свою очередь, вызывает

мощные окислительные процессы. Другими словами, не рачок эпишура определяет чистоту воды Байкала, а уникальная окислительная машина озера, которая окисляет все поллютанты и позволяет рачку эпишуре там благополучно размножаться. Важно не нарушить это равновесие, потому что у любой системы есть пределы устойчивости. Главную опасность для озера представляет не столько Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат на южном берегу, сколько нарушения в истоке Ангары и устье Селенги в результате подтопления, поскольку и дельта Селенги как природная очистная система, и исток Ангары – важные регулирующие факторы для процесса циркуляции воды в Байкале.

Некоторые прогнозы на XXI век

У человечества очень много проблем в будущем, и все они привязаны к Земле. Образно говоря, мы «прикованы» к проблемам Земли. В пределах темы моего выступления могу сделать только некоторые выводы. Первый – превращение геологии в науку с высоким уровнем моделирования и предсказания; эта тенденция будет продолжена и в XXI в. Наверное, никогда не удастся предсказать точно многие катастрофы, в частности землетрясения. Но перед наукой стоит задача не столько предсказания, сколько управления этим процессом. Я надеюсь, что развитие вибросейсмических технологий позволит решить и эту проблему.

Второй вывод – это превращение всего цикла наук о Земле в комплексную науку об окружающей среде, а также в планетологию. Получение новых знаний о Венере и Марсе позволит еще лучше понять работу «тепловой машины» Земли и многие другие процессы.

И третий вывод – превращение геологии и горного дела из наук о полезных ископаемых в комплексную технологическую науку. Когда человечеству нужны были поверхностные месторождения и они еще не все были исчерпаны, бурно развивалась геология. Когда появилась потребность в месторождениях, глубоко залегающих, особенно в месторождениях нефти и газа, – бурно развивалась геофизика, причем не как мировоззренческая наука, а как обслуживающая науку о полезных ископаемых. Сейчас на первое место выходят технологии. Например, один из ведущих геологов, американец китайского происхождения Кеннет Сю, считает, что сегодня наиболее важны четыре задачи: 1) извлечение металлов из рассолов и морской воды; 2) подземное выщелачивание металлов – несомненно вытаскивать руду на поверхность, надо извлекать их прямо в недрах; 3) получение угле-

водородов из углистых сланцев, битуминозных пород и вязких нефтей, поскольку рано или поздно хорошие нефть и газ кончатся; 4) подземная газификация углей и других горючих ископаемых. Эти технологии, безусловно, будут технологиями XXI в. – не знаю только, первой или второй его половины. Роль геологии как науки о полезных ископаемых будет уменьшаться, а увеличится ее роль как общепланетарной науки, предсказывающей изменения природной среды, природные (техногенно-природные) катастрофы.